

tation des moulages endocraniens. Il est d'ailleurs assez amusant de regarder les reconstitutions faites à l'époque: elles ne ressemblent guère à un Londonien actuel ! Notons au passage que quelques très rares anthropologistes, dénièrent, dès le début, toute valeur à ce « fossile » (Weidenreich, von Königswald). A partir de cet homme très ancien et d'allure moderne, toute une lignée fut créée. Ceux qui ont lu les œuvres du Père Thélard de Chardin sont familiarisés avec cette lignée ancienne, dite des « présapiens » (si le P. Thélard de Chardin ne parle pas de Piltdown, c'est que des censeurs bien intentionnés ont supprimé ce qu'il en avait dit dans l'édition de ses œuvres complètes). Que reste-t-il de cette lignée, 10 ans plus tard ? Rien ou presque: les auteurs rattachent actuellement les hommes de cette lignée aux Néanderthaliens, ce qui, d'ailleurs, avait été proposé depuis fort longtemps.

Il est probablement normal que, lorsqu'il s'agit de l'homme, les discussions prennent un tour passionné qu'elles n'ont pas obligatoirement ailleurs. Le problème religieux se mêle au problème scientifique, ce qui ne simplifie pas la discussion. Il semble néanmoins que progressivement l'atmosphère s'éclaircisse. Il nous reste encore à espérer que Archéologues et Préhistoriens reçoivent de plus en plus une formation scientifique et non littéraire comme maintenant: ceci ne troublerait pas leurs investigations et faciliterait le dialogue dont nous avons tous besoin.

## ENSEIGNEMENTS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES RESULTANT DE L'ETUDE DE RECENTS BARRAGES EN SUISSE

(celui de la Grande Dixence en particulier) <sup>1</sup>

*par N. Oulianoff*

Professeur honoraire de l'Université de Lausanne

1. — L'histoire de la construction de très grands barrages en Suisse commence par celui de Barberine mis en chantier en 1921. Il est vite devenu célèbre comme premier construit en haute montagne (à l'altitude de 1890 m). Cela signifie que les constructeurs ont été obligés

---

<sup>1</sup> Cet article a paru dans « Les congrès et colloques de l'Université de Liège », 1959, volume 14.

d'affronter des difficultés inconnues jusqu'alors. Pendant les années écoulées depuis cette époque la technique progressait à pas de plus en plus accélérés. Grâce à ce progrès, les projets aussi gigantesques que celui de Mauvoisin (barrage-voûte avec le mur haut de 230 m) et, en particulier, celui de la Grande Dixence sont devenus réalisables. La Tour Eiffel dépassera, par quelque 15 m seulement, la couronne de ce dernier barrage, dont le mur aura une hauteur de 284 m.

Je ne me propose pas de retenir ici votre attention sur les problèmes purement techniques, quoique leurs solutions adaptées aux conditions de la haute montagne aient enrichi grandement les méthodes de construction. Nous resterons essentiellement dans les limites des problèmes géologiques.

Cependant la diversité, dans les Alpes, des structures géologiques, de la composition lithologique, de même que des conditions morphologiques et hydrologiques est si grande, qu'il serait impossible d'examiner les divers cas dans un seul article. Je présenterai donc ici quelques-uns des problèmes essentiels, surgis lors des grandes constructions hydro-électriques en Suisse et en tenant compte en particulier du cas d'une importance exceptionnelle, celui de la Grande Dixence.

Le sort a bien voulu que je m'occupe dès son début et pendant quelques années de toutes les recherches géologiques préliminaires relatives à cette gigantesque entreprise et ensuite de l'examen des divers problèmes géologiques qui se précisaient durant la première période, période décisive de sa réalisation. (Les travaux de recherches géologiques ont été commencés en 1947. En 1950 ont débuté les travaux techniques d'installation.)

2. — Le premier problème de nature géologique, qui se pose lors de l'élaboration du projet d'un nouveau barrage, se rapporte à la solidité de la base rocheuse sur laquelle sera assise la masse pesante de béton (dans le cas de la Grande Dixence, 5,9 millions de m<sup>3</sup>). La nature des roches, leur structure, leur perméabilité, l'existence des zones susceptibles de jouer comme plans de glissement — tout cela doit passer par le crible d'une critique géologique serrée, d'autant plus serrée que tous ces éléments, de première importance pour la solidité de la future cons-

---

Les cartes à consulter: a) pour l'aperçu général: 1) Carte générale provisoire de la Suisse au 1 : 200.000 en 4 feuilles, éditée par le Service topographique fédéral à Berne; 2) Carte de la Suisse en 4 feuilles au 1 : 200.000, Edition géographique Kümmerly et Frey à Berne; b) pour l'examen détaillé: feuilles de la Carte nationale de la Suisse au 1 : 50.000, par le Service topographique fédéral à Berne (presque toute la collection est déjà publiée).

truction, doivent être examinés *en bloc* pour toute la masse rocheuse considérée. Les tentatives de les traiter par une analyse mathématique et par quelques expériences *partielles* au laboratoire ou sur le terrain même n'arrivent pas à remplacer la synthèse géologique, quoique cette dernière ne s'exprime que par des termes approximatifs. Seules les méthodes géophysiques viennent parfois contribuer efficacement à la synthèse géologique.

Le choix de l'emplacement d'un futur barrage n'est pas particulièrement difficile dans les conditions des Alpes. Cette dernière proposition exige une explication. Le territoire de la Suisse est divisé, par la nature même, en trois zones nettement différenciées au point de vue des conditions géologiques. Ce sont: le Jura, la région molassique (désignée souvent par l'expression de Plateau suisse) et la chaîne complexe des Alpes. Cette troisième zone occupe la plus grande surface et son altimétrie moyenne est de beaucoup plus considérable que celle des deux premières zones. C'est donc dans les Alpes que se trouvent les plus nombreux aménagements hydro-électriques, les plus importants comme puissance et les plus complexes comme structure de leurs ensembles.

Les glaciers ont contribué puissamment à la création des profils classiques des vallées: la mise en évidence des zones de roches dures formant des barrières, des verrous, et le surcreusement consécutif approfondissant et élargissant les bassins situés en amont des verrous. Mais il est évident que le verrou choisi pour y fonder un barrage doit subir un examen géologique minutieux afin de juger de sa solidité et de son imperméabilité. L'importance capitale représente la recherche relative à l'existence éventuelle des anciens lits de torrents qui traversaient antérieurement le verrou. Remplis presque toujours par du matériel meuble, ces anciens lits sont perméables. Les conditions géométriques du verrou sur lequel s'appuie le mur de la Grande Dixence, sont particulièrement favorables pour la construction de ce barrage, dont la base seule mesure (en profil) 215 m. Ce verrou est large (500 m environ) et s'incline faiblement de l'amont vers l'aval, où il est limité par une dénivellation brusque. Mais les préoccupations du géologue sont les mêmes dans toutes les études préliminaires concernant l'implan-

---

#### Légende de la figure 1.

Carte, dressée par le Service fédéral des eaux, montrant la distribution en Suisse (état au 1.1.1958) des aménagements hydroélectriques à production annuelle moyenne dépassant 20 millions de kWh. (Publiée le 31.7.1958 dans la « Gazette de Lausanne », par F. Chavaz.)

# Usines et groupes d'usines hydroélectriques

dont la  
production annuelle moyenne  
dépasse 20 millions de kWh

Etat au 1<sup>er</sup> janvier 1958

## Légende

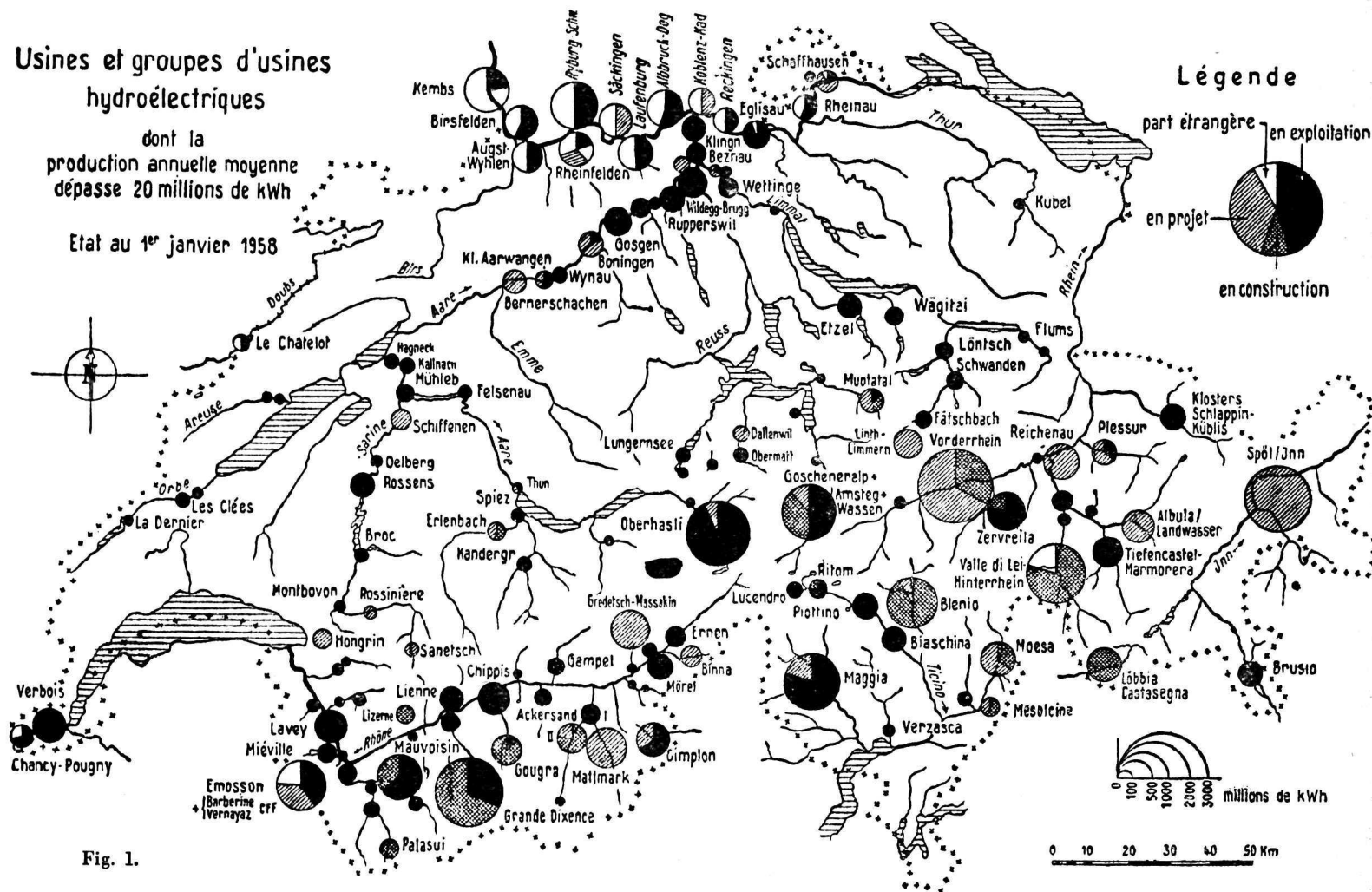
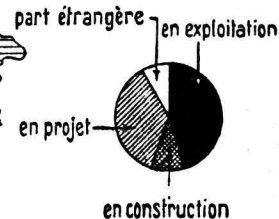


Fig. 1.

tation du barrage même, et je ne m'y arrête pas davantage en ce moment.

3. — Les anciens aménagements de retenues, comme celle de Barberine, ou cette autre de Grimsel, ont été réalisées, au commencement, pour n'exploiter qu'un seul bassin versant. Ce n'est que plusieurs années après l'achèvement des travaux, que les programmes de la création de ces retenues ont été complétés par l'utilisation des eaux des autres bassins versants (par exemple, l'amenée d'eau d'Emaney pour le lac de Barberine).

Le Service fédéral (suisse) des Eaux a présenté en 1945 l'aperçu général des disponibilités quant aux forces hydrauliques dans le bassin du Rhône (voir fig. 1). Ce rapport marque une véritable date dans le développement des aménagements hydro-électriques en Suisse.

Le régime des eaux en Suisse comprend tout naturellement deux faces:

— d'une part, pendant l'hiver, le stockage de neige et de glace avec la diminution considérable des débits des cours d'eau.

— d'autre part, en été, l'augmentation considérable de débit de sorte que les usines travaillant au fil de l'eau sont obligées de laisser couler une grande quantité d'eau sans pouvoir l'utiliser.

On ne peut remédier à cet état de choses, que par l'accumulation des eaux pendant la fonte des neiges et de glace, et notamment dans les bassins situés aux grandes altitudes pour exploiter ainsi l'augmentation de la chute. Or la création des retenues pour chaque bassin versant isolé avec la conduite forcée et la centrale correspondante n'est pas réalisable pour la raison économique principalement, mais aussi à cause des difficultés topographiques et géologiques. D'autre part, le progrès de la technique du creusement des souterrains ouvre des possibilités nouvelles pour la création des canaux d'amenée.

Ainsi le projet du Service fédéral des Eaux, prévoyait l'utilisation des eaux des bassins versants d'une vaste région ramenées par un système de galeries dans le Val des Dix, à la retenue où se trouvait l'accumulation de la Dixence, créée déjà antérieurement. Tout naturellement, c'est la Société de l'Energie de l'Ouest Suisse (E. O. S.), concessionnaire du Val des Dix qui s'est intéressée à ce projet.

La surface totale des bassins versants qui intéressent la Grande Dixence est à peu près de 450 km<sup>2</sup>, dont 250 km<sup>2</sup> environ sont recouverts de glaciers. Les bassins versants ne sont actifs, pratiquement, qu'en été. En hiver, leur débit est relativement faible, et l'on doit encore abandonner une partie de l'eau pour la pêche, pour la population rive-

rairie ainsi qu'éventuellement pour les usines électriques au fil de l'eau, situées au niveau inférieur de l'altitude de captage prévue par le nouveau projet. Tous les bassins versants (dans le périmètre de 450 km<sup>2</sup>) doivent fournir, selon les prévisions météorologiques, 650 millions de m<sup>3</sup> pendant 5 mois d'été, tandis que le volume minimum nécessaire pour

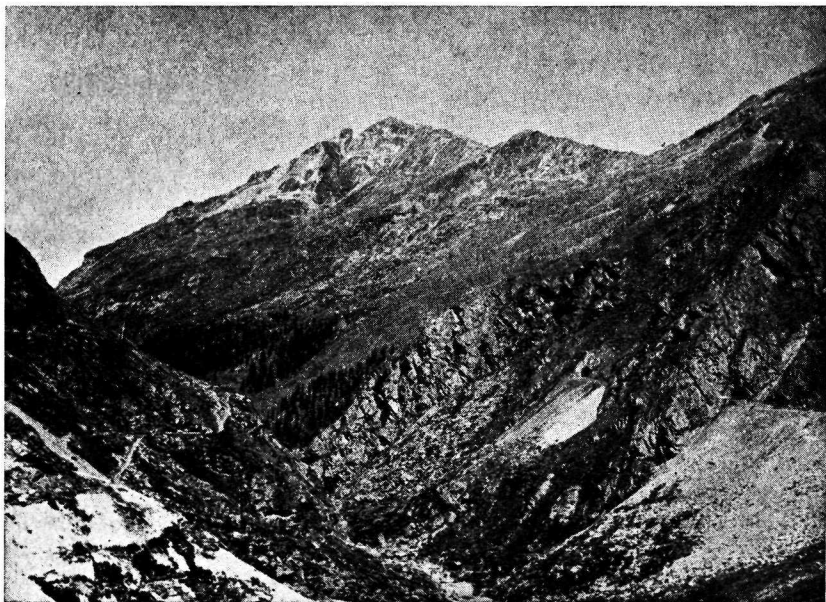


Fig. 2. — L'emplacement du barrage de la Grande Dixence vu avant le commencement des travaux. L'ancien barrage se trouve derrière l'opérateur qui regarde vers l'aval la gorge taillée dans le verrou. (Cliché de N. Oulianoff.)

le remplissage du futur lac de la Grande Dixence est de 350 millions de m<sup>3</sup>. La différence comprend les crues non captables, ainsi que le débit des torrents qui resteront non captés, et la restitution obligatoire des eaux. La carte ci-jointe (voir la fig. 3) représente le système d'alimentation du lac de la Grande Dixence.

En dehors de l'aménagement de la Grande Dixence, la nouvelle tendance de ramener plusieurs bassins versants dans une seule retenue caractérise plusieurs autres projets qui sont en partie déjà en voie de réalisation. La carte ci-jointe (voir la fig. 4) de l'aménagement de la vallée Blenio en est encore un exemple très caractéristique, et imposant également par la grande surface totale des nombreux bassins versants mis à contribution.

4. — Je n'entrerais pas ici dans la description du système complexe des divers captages des eaux dans la région qui intéresse la Grande Dixence. Le plan total a subi déjà des modifications partielles depuis le moment de l'établissement du premier projet. Cela est compréhensible, si l'on tient compte des nombreuses questions qu'il fallait régler et qui sont de nature géologique, économique et juridique. Toutefois, voici un point qu'il serait intéressant de relever.

Le premier projet n'envisageait que le captage des eaux disponibles, en dessus du niveau de 2 400 m (donc un peu plus haut que le niveau supérieur du futur lac). Malgré la décrue, presque générale, des glaciers dans les Alpes, plusieurs glaciers descendent encore plus bas que ce niveau. Aussi le premier projet prévoyait le *captage* de plusieurs *torrents sous-glaciaires* pour assurer à toutes les eaux captées l'écoulement libre dans les galeries, en évitant l'intervention des pompes. Dans ce but, on a entrepris des recherches importantes par les méthodes géophysiques. Toutefois, l'incertitude de la plupart de ces captages sous-glaciaires a obligé de modifier partiellement le principe même et d'introduire l'utilisation des pompes. Du même coup, les eaux du niveau de 2 000 m ramenées au niveau de 2 400 m par pompage sont devenues utilisables dans une chute totale de 1 880 m.

5. — Le système de la cumulation de plusieurs bassins versants dans une seule retenue simplifie et même annule, pratiquement, le problème de l'*alluvionnement* du bassin créé derrière le barrage. En effet, les eaux des divers versants sont déversées dans le lac artificiel après l'écoulement par les galeries, de sorte que presque tout le matériel meuble, sauf de très fines suspensions, reste dans les vallons d'où proviennent les eaux captées. Avant la création du premier barrage de la Dixence, la question avait été déjà posée relativement à l'évolution de ce lac. Une étude détaillée a été faite à cette intention par R. BOISSIER (1921). L'auteur est arrivé à la conclusion, que la surface de 43,16 km<sup>2</sup> du bassin versant produit au maximum 28.000 m<sup>3</sup> par an de matériel meuble. Il tenait donc pour probable que le lac aurait, toutes les conditions climatiques restant égales, une durée de plus de *dix siècles*. Depuis lors (sans oublier toutefois quelques travaux antérieurs de L.-W. COLLET) le problème de l'alluvionnement n'a pas été sérieusement examiné en ce qui concerne l'activité des grands torrents dans les Alpes.

#### Légende de la figure 3.

Carte montrant la surface (hachurée) occupée par les bassins versants qui seront exploités par l'aménagement de la Grande Dixence. (Publiée le 6.2.1958 dans la « Gazette de Lausanne », par D. Favre.)

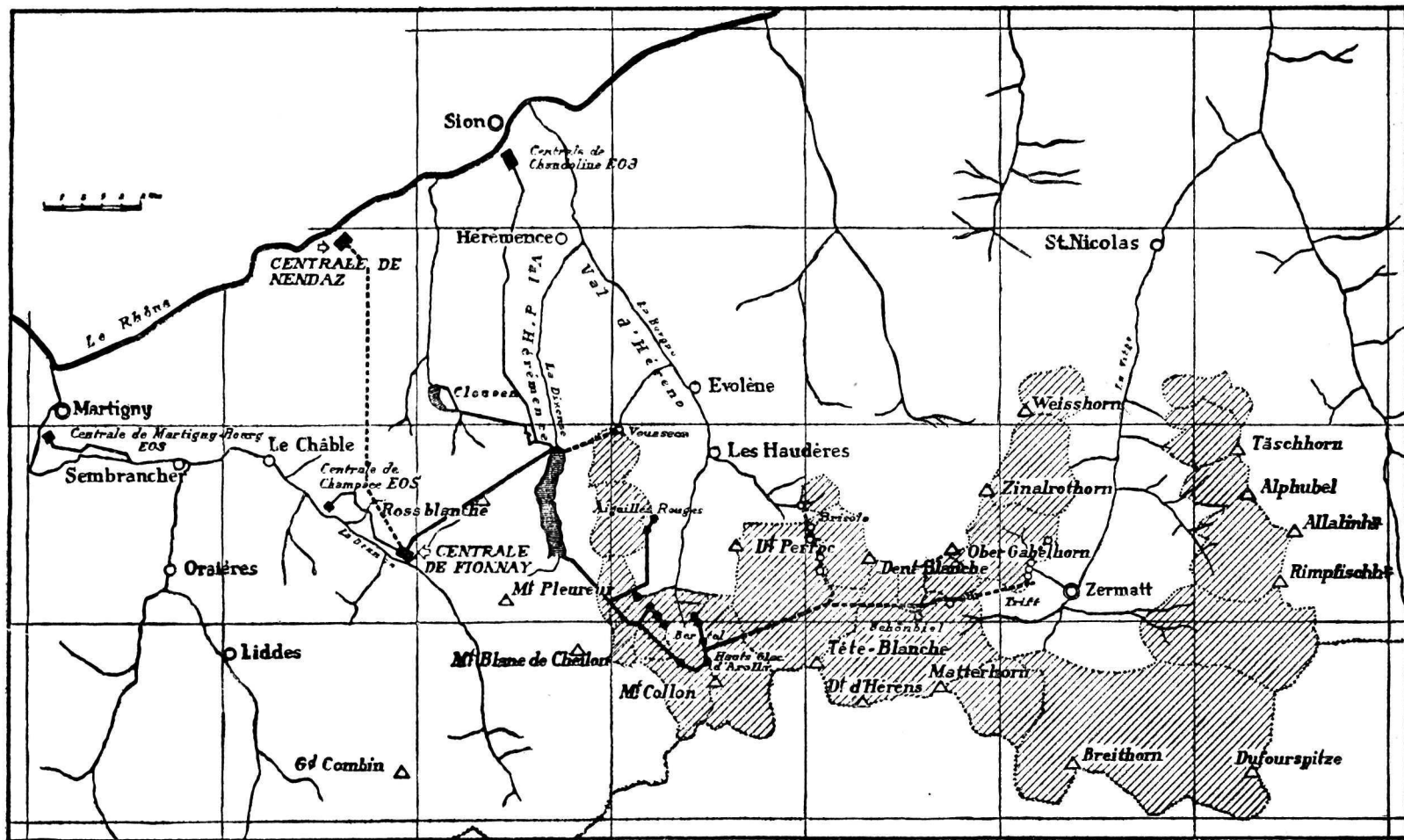


Fig. 3



Il est possible que le sort des retenues du système de Maggia au Tessin obligerait de reprendre l'examen de cette question, car la région de Maggia est connue par de massives précipitations (2 m/an et même davantage), qui favorisent grandement le progrès de l'érosion dans les roches relativement tendres.

6. — Avec la création des grands lacs dont la surface se mesure par dizaines de km<sup>2</sup>, devrait se poser aussi la question concernant les pertes d'eaux dues à l'évaporation. Malheureusement, l'étude de ce problème, qui préoccupe de plus en plus les hydrologues aux U.S.A. et en Russie, se trouve en Suisse dans un état encore rudimentaire. Autrefois, c'est l'ingénieur-hydrologue LÜTSCHG qui s'intéressait à cette question. Cependant les observations et les expériences faites dans ce but sont loin d'être suffisantes. Et jusqu'à présent, en évoquant le rôle de l'évaporation dans la balance des eaux d'une retenue donnée dans les montagnes, on n'articule qu'un ou deux chiffres considérés comme parfaitement valables pour toutes les régions de la Suisse. Or, la morphologie compliquée de ce pays avec de nombreuses et hautes barrières rocheuses diversement orientées et avec les variations brusques des altitudes, crée des conditions climatiques fort inégales. Certaines régions sont caractérisées par l'abondance de précipitations (comme celle de Maggia, citée plus haut). Par contre, d'autres, même toutes voisines, souffrent d'une sécheresse. De même la morphologie compliquée et capricieuse dans la haute montagne, détermine l'isolement des vallées soumises les unes au régime des vents qui amènent des pluies, tandis que dans les autres règnent des vents desséchants favorisant l'évaporation. De toute évidence, un travail long et minutieux s'impose, si l'on veut obtenir le coefficient numérique d'évaporation correspondant à une région donnée. Et ces recherches, dans les conditions de la morphologie compliquée des Alpes, devraient être réalisées pour plusieurs régions particulièrement différenciées.

7. — La *fabrication du béton* pour le barrage exige, en dehors du ciment, une quantité considérable d'agréats. Même dans le cas d'un barrage-voûte, comme celui de Mauvoisin, à lignes si élégantes, aériennes, le volume d'agréats utilisés est impressionnant. Mais la consommation des agréats par les barrages-poids est encore incomparablement plus grande. La Grande Dixence se situe presque à la première place dans le monde entier avec les 5,9 millions de m<sup>3</sup> de béton qu'exige sa réalisation. Quand les calculs préliminaires pour ce dernier barrage ont abouti à ce chiffre, le constructeur s'est vu brutalement placé devant un second problème devenu de première importance, d'une importance

cruciale. En effet, où pourrait-on trouver un stock de matériaux nécessaires assurant la fourniture de cette masse d'agréats ? La première et très logique solution orientait vers l'exploitation du gravier dans les alluvions de la vallée du Rhône qui serait transporté par les téléphériques (sur une distance de presque 20 km, avec une dénivellation de

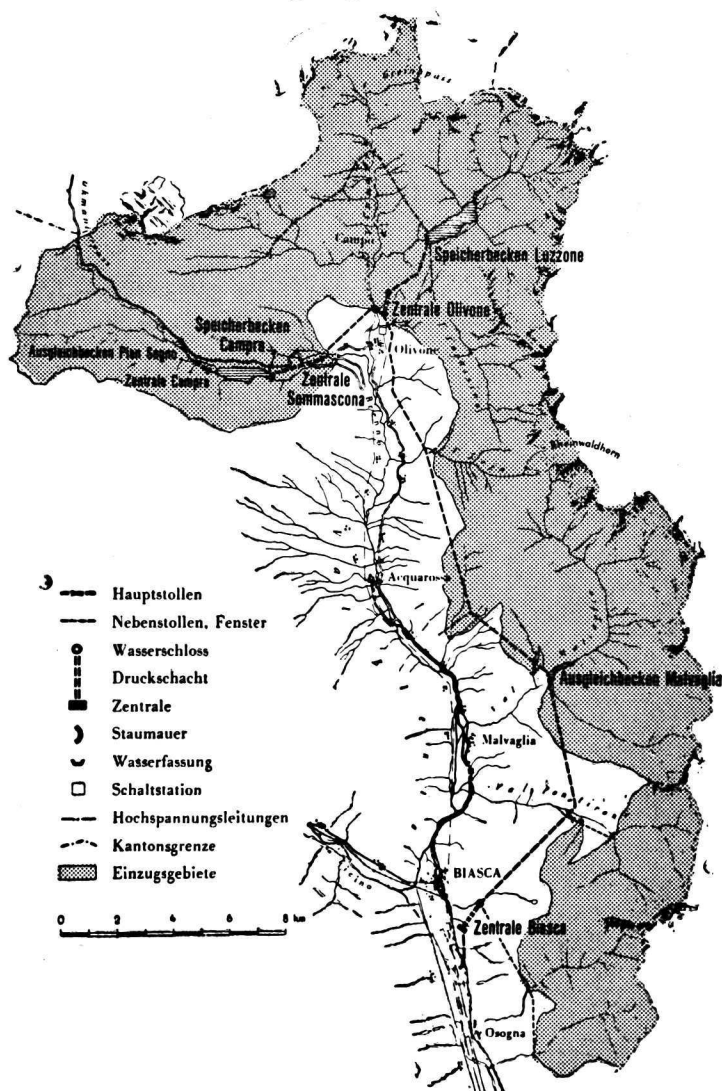


Fig. 4. — Aménagement hydroélectrique du Val Blenio. Les surfaces marquées par de petits points sont celles qui correspondent aux bassins versants. (Publié dans le No 1, 1956 de la revue: « Cours d'eau et énergie. )

presque 2 000 m). Mais le prix prohibitif de cette solution mettait en question la réalisation du projet tout entier. La tâche qui incombait alors au géologue a été grave: il fallait trouver un gisement de matériel approprié, en quantité suffisante, permettant une organisation facile de l'exploitation, situé à proximité du futur barrage et dans les conditions assurant le transport sans interruption. De tels problèmes à faces multiples ne sont pas faciles à résoudre dans les conditions géologiques et morphologiques de la haute montagne, dans les Alpes en particulier. La morphologie de cette chaîne, encore jeune, est très accidentée. De même, la tectonique étant très compliquée, la composition pétrographique est variée, et la structure, complexe, car les périodes successives de plissements ont pétri, à plusieurs reprises, ces masses rocheuses, les ont sectionnées et brouillées. Les recherches minutieuses sur le terrain



Fig. 5. — Moraine frontale du glacier de Prafleuri. (Cliché de N. Oulianoff.)

m'ont permis d'aboutir à une heureuse solution. Sous le nom de Prafleuri elle entre comme un élément important dans l'ensemble de l'entreprise. Par ses divers aspects la carrière de Prafleuri présente une curiosité spectaculaire que l'on montre volontiers aux visiteurs. De dimensions exceptionnelles, située à une altitude moyenne de 2 800 m, elle est la plus élevée de son espèce en Europe. La morphologie très favorable de la partie supérieure du Vallon de Prafleuri offre au village des travailleurs et aux bâtiments de concassage une situation bien abritée. Le transport du ballast préparé est assuré par un tapis roulant logé dans un tunnel long de 1 600 m et débouchant directement au-dessus du barrage. On exploite les gigantesques moraines accumulées au confluent de deux glaciers, celui de Prafleuri et celui de Mourti. Bien entendu qu'en dernier lieu l'acceptation de cette solution dépendait, en ce qui concerne la qualité du matériau, de l'expertise des spécialistes en béton.

8. — Comme nous avons vu plus haut, la nouvelle tendance en Suisse s'exprime par la cumulation de nombreux bassins versants en ramenant leurs eaux vers une seule retenue. Sauf des cas isolés, la morphologie des Alpes oblige de le faire au moyen de souterrains. Et les exigences de l'économie obligent le constructeur de réduire au minimum la longueur totale de ces canaux d'amenée. Ceci s'exprime par l'attribution à certaines de ces galeries du rôle de collecteurs. Le volume considérable des eaux captées répercute alors sur la dimension des sections des souterrains. Elles sont particulièrement importantes en ce qui concerne les canaux d'amenée en direction des centrales. L'examen géologique préliminaire est nécessaire pour que le constructeur puisse avoir l'idée, ne fut-ce qu'approximativement, des conditions géotechniques avec lesquelles il aura à faire. C'est élémentaire, et chaque géologue a eu des occasions d'effectuer des examens de cette nature. Mais j'évoque ce chapitre faisant partie de l'ensemble des recherches géologiques relatives à la réalisation des aménagements hydro-électriques, à cause de l'introduction d'une nouvelle technique de percement des souterrains. Jusqu'à 1945 on utilisait en Suisse des marteaux piqueurs individuels. Après la dernière guerre, une nouvelle s'est répandue rapidement parmi les constructeurs: on perce, aux Etats-Unis, de même qu'en Suède, des galeries ayant 20 m<sup>2</sup> et davantage, directement par pleines sections sans passer par les étapes de la méthode dite belge. Les perforatrices complexes américaines (jumbo) soulevaient une admiration générale. La première impression a été, que l'on réalise, avec cette mécanique, une forte économie.

Toutefois le professeur ANDREAE, spécialiste des tunnels, n'a pas manqué d'exprimer des avertissements prudents dans le but de calmer l'enthousiasme exagéré qui accompagnait l'apparition, sur les chantiers dans les Alpes, des premiers jumbos ou chariots de forage.

Les constructeurs en employant cette nouvelle technique essayaient, au début, de pratiquer, avant le bétonnage, l'enlèvement, dans le but d'économie, des cintres métalliques, comme cela a été l'usage avec le boisage classique. Toutefois on a aperçu rapidement que l'avancement accéléré ne pouvait être réalisé qu'avec l'abandon de ces cintres dans le revêtement définitif en béton et au prix de mesures importantes assurant la sécurité. Or, cette sécurité dans les souterrains alpins devient de plus en plus nécessaire et coûteuse en fonction de l'augmentation de la section de la galerie. Nous touchons ici au problème capital du point de vue géologique de même que pour la pratique du percement des souterrains de grandes sections. C'est le problème de la pression de la montagne (*Gebirgsdruck* des auteurs allemands). Il est compréhensible que plusieurs organismes de caractère international se sont occupés de cette question. Je ne vous présente ici, que très brièvement des arguments relatifs à la nature de ce que l'on se plaît d'appeler la pression de la montagne dans les souterrains. On la considère habituellement comme une réaction de la gravité, du poids de toute l'épaisseur de la masse rocheuse située au-dessus de la galerie. Les manifestations de ce phénomène s'expriment par la chute de pierres, de blocs rocheux, voire même par l'écroulement de grosses plaques qui se détachent de la voûte ou des piédroits.

Mais si le poids de toute la masse rocheuse de la calotte en serait la cause, il faudrait voir son effet partout identique, dépendant seulement de l'épaisseur de la calotte, les roches les plus répandues ayant, en moyenne, le même poids spécifique. Albert HEIM, géologue, a introduit une autre notion, notamment l'intervention de la résistance des roches à l'écrasement. En partant du coefficient de la résistance à l'écrasement d'une roche donnée il calculait la hauteur de la colonne rocheuse qui écraserait, par son propre poids la base de cette même colonne. « Pour les roches caractérisées par divers coefficients cette hauteur se trouve entre 500 et 6 000 m » (HEIM). Donc, ce n'est pas la gravité seule qui entre en ligne de compte, mais aussi la résistance des roches à l'écrasement. Cependant, ce dernier raisonnement omet, lui aussi, de tenir compte d'un fait important, notamment de celui que la pression ne se réalise que par le *déplacement* de la matière qui sert d'agent de transmission de l'effort. En creusant une galerie dans une

épaisse masse rocheuse, nous privons la « colonne » de HEIM de sa base. En s'écrasant, elle devrait donc descendre pour combler le vide. Or, cette « colonne » n'est découpée de toute la masse rocheuse que par notre imagination. Dans la nature, elle fait partie intégrante du volume, pratiquement illimité, de masses rocheuses auxquelles la « colonne » en question est soudée par l'adhésion intime des minéraux et par le frottement des particules des unes contre les autres sur toute sa hauteur. La viscosité du milieu est, par conséquent, pratiquement impossible à vaincre. Autrement dit, la transmission éventuelle de la pression ne peut se produire que dans un temps infini. Les grandeurs de cet ordre appartiennent au domaine de spéculations scientifiques et philosophiques. Si l'on veut les utiliser à l'échelle humaine, elles se trouveront de loin en dehors de l'horaire disponible à l'observateur. Dans la limite de cet horaire, elles ne se chiffrent que par zéro.

D'autre part, chaque praticien, qui a eu l'occasion de s'occuper des souterrains, peut citer de nombreux cas des poussées dangereuses qui se déclarent sous des calottes de faible épaisseur. Et inversement, de nombreuses galeries ayant des calottes de grande épaisseur se présentent comme parfaitement saines, sans aucune manifestation néfaste du phénomène de pression.

Par contre, il y a un groupe d'observations, aux résultats concordants, qui mérite d'être retenu avec attention. Le percement des souterrains à travers les chaînes de montagnes à tectonique simple rencontre (pour toutes espèces de roches) moins de difficultés que dans les cas où l'on a affaire avec les mêmes roches mais affectées par la structure tectonique compliquée. La manifestation, dans les souterrains, du phénomène que l'on désigne comme pression de la montagne n'est autre chose que l'effet résultant de l'action des forces tectoniques. Les mouvements tectoniques déterminent la formation dans la croûte terrestre, de plis et de cassures. L'abondance des plis dans les masses rocheuses caractérise la structure désignée, souvent, par les géologues, sous le nom de la tectonique plastique. Par contre, une abondance de failles fait caractériser la région correspondante comme appartenant au régime de la tectonique cassante. Or, le terme « plastique » n'a rien de réel, dans notre cas. Tout dépend de l'échelle à laquelle le phénomène donné est observé. La structure plastique, parfois tout à fait frappante, apparaît comme telle, à l'observateur, lorsque ce dernier l'examine d'une certaine distance. Mais ces plis majestueux ne sont pas produits tel un moulage en matière véritablement plastique (argile par exemple), c'est-à-dire plastique en petit. Un examen détaillé suffit pour faire voir que

les charnières des plis sont des lieux où apparaissent de multiples cassures. C'est grâce à ces cassures que la masse rigide a pu être ployée selon le plan qu'exécutaient, en grand, les forces mises en jeu pendant la formation de la chaîne de montagnes. Ceci est vrai pour les plis qui mesurent plusieurs dizaines de mètres et même pour ceux qui ne sont visibles qu'au microscope.

Le constructeur, pendant le creusement d'une galerie, en travaillant à l'échelle humaine, aura toujours affaire avec la tectonique différentielle cassante et jamais véritablement plastique, sauf les cas des couches d'argile ou de schistes argileux se trouvant encore au début de leur consolidation.

Mais à part les plis, nous avons encore à considérer les cassures nettement exprimées comme telles. Quatre systèmes de cassures dissèquent chaque masse rocheuse qui avait participé à une orogénèse: deux systèmes approximativement perpendiculaires entre eux, deux autres également, mais formant un angle moyen de  $45^{\circ}$  avec les cassures des deux premiers systèmes. La fréquence des cassures, leur extension et l'importance de l'écrasement produit par chacune d'elles varient d'une place à l'autre. Mais dans les Alpes nous voyons apparaître en plus de nouvelles complications. Les roches que l'on y trouve, à partir des très anciennes et jusqu'à de toutes jeunes ont été *successivement* plissées par des mouvements orogéniques, dont le nombre est de trois, au moins. Les axes des plis qui caractérisent ces périodes ne sont pas parallèles entre eux. Aussi les quatre systèmes de cassures produits par chacune des orogénèses se croisent également sous divers angles. On imagine facilement à quel point est compliqué le réseau total de ces cassures superposées. Le constructeur, lors du percement d'une galerie, n'a plus affaire avec une masse rocheuse homogène à l'état initialement intact. On est plutôt en droit de dire, que l'état des masses rocheuses y est comparable à une « maçonnerie sèche ». Les propriétés mécaniques des roches déterminées au laboratoire sur les *échantillons isolés* ne sont pas applicables aux *ensembles rocheux* que traverse un souterrain.

Comme la fréquence des cassures varie, certains compartiments, dans les masses rocheuses, peuvent échapper au morcellement. Le souterrain traverse alors une zone relativement saine. S'il s'agit alors d'une roche de nature granitique, le constructeur essuie parfois de désagréables et dangereux éclatements (Bergschäge des auteurs allemands). Ce sont des solutions locales, vers le vide (galerie), d'une tension créée par un mouvement tectonique, mais restée encore à l'état potentiel.

9. — En relation avec cette structure morcelée — presque générale dans les Alpes — se trouve le problème de l'imperméabilité des galeries. En principe, elles sont toujours perméables, même si elles traversent la roche qui est comme telle, imperméable. Mais ici intervient un autre facteur, dont le géologue tiendra compte, soigneusement. J'ai comparé plus haut avec une « maçonnerie sèche », l'état de morcellement des masses rocheuses dans les Alpes. Cette comparaison est valable en ce qui concerne la structure. Mais la « maçonnerie » dans la montagne n'est jamais « sèche » sauf de rares exceptions. Les interstices entre les « moellons » naturels sont toujours humides (état statique de l'eau) ou ils suintent ou même offrent aux eaux souterraines une voie pour la circulation. Cette gradation détermine l'importance de la perméabilité des parois dans les souterrains donnés. Les canaux d'amenée à écoulement libre ou ceux, dans lesquels l'eau n'est soumise qu'à une faible pression peuvent être laissés, dans certains tronçons, sans revêtement ou être munis d'un revêtement de précaution. La question se présente autrement dans le cas où l'eau dans le canal d'amenée est soumise à une pression qui s'exprime par plusieurs atmosphères. Si le souterrain longe, même à une distance de plusieurs dizaines de mètres, le flanc de la montagne, le revêtement devra être complet et sa puissance devra correspondre à la pression de l'eau dans le canal. Mais si le canal d'amenée traverse le corps de la montagne, le géologue tiendra soigneusement compte de la *structure* interne des masses rocheuses, de leur nature pétrographique et en particulier de la *morphologie* de toute la région. Le stock des eaux souterraines naturelles dans les montagnes est renouvelé, dans la plupart des cas, par des infiltrations des eaux météoriques. Ces dernières ne peuvent pénétrer dans le corps de la montagne que dans le cas où existent des interstices libres pour recevoir ce nouvel apport d'eau. C'est souvent le cas pour la zone de très faible épaisseur entre la surface de la terre et la surface piézométrique. En dessous de cette dernière surface commence la zone qui devient plus ou moins rapidement une zone de saturation, zone des eaux mortes ou stagnantes. Dans les régions à morphologie accidentée, coupée par de profondes vallées, la zone aquifère saturée se trouve enfouie profondément, car les eaux plus proches de la surface s'écoulent sous forme de sources sur les pentes des vallées. Mais si le corps de la montagne donnée est large, si les vallées, susceptibles d'appeler les eaux souterraines se trouvent à de grandes distances les unes des autres, alors la surface séparant les eaux mobiles, plus proches des vallées, et les eaux mortes, cette surface se situe de plus en plus haut dans le corps de la montagne. Le souter-



rain creusé dans la zone des eaux mortes servira alors de drainage. Si ce souterrain assurant l'écoulement des eaux sous pression reste sans revêtement, un simple calcul, qui tiendra compte des conditions morphologiques, permettra d'établir les pertes possibles, ou l'état d'équilibre entre les deux régimes d'eau ou enfin le gain par le canal de l'eau introduite sous l'effet de la pression extérieure.

Voici un intéressant exemple de l'application du raisonnement exposé ci-dessus à un cas pratique. Une galerie d'amenée, longue de 8,6 km et sans fenêtres, relie la retenue de la Dixence au Val de Bagnes (voir fig. 3). Elle est exposée à la pression intérieure qui se chiffre par 200 à 220 m d'eau. A la suite de mes recherches géologiques concernant le tracé de ce souterrain j'ai examiné également le problème relatif à sa perméabilité éventuelle. Ma conclusion (en 1949) a été nette dans le sens, que ce souterrain, malgré sa fissuration aquifère abondante, ne serait pas marqué par la fuite des eaux (sauf à ses deux extrémités où la calotte s'amincit), mais plutôt bien par un apport. L'intérêt de ce cas est sensiblement augmenté par le fait, qu'après le percement de la galerie, la direction de la Grande Dixence a décidé de soumettre ce souterrain à l'essai sous pression. Les résultats de ces expériences ont été publiés dans le *Bulletin technique de la Suisse Romande* (1958, N2), et j'ai eu le plaisir de constater qu'ils confirment pleinement mes prévisions.

10. — Après la belle réussite de la *centrale souterraine* à Innertkirchen (vallée de l'Aar, près de Meiringen) les constructeurs cherchent souvent dans cette direction les solutions correspondantes, surtout en tenant compte de la morphologie accidentée de la Suisse. En effet, il arrive que la nature refuse catégoriquement d'accorder au constructeur la place nécessaire pour la construction d'une centrale à ciel ouvert. Tel a été, par exemple, le cas pour la centrale de la Grande Dixence à Fionnay, premier palier de l'utilisation de l'eau du nouveau lac. Même dans le corps de la montagne la place manquait et ce n'est qu'avec difficulté et au moyen des sondages par galeries qu'a été précisé le compartiment nécessaire offrant de bonnes conditions lithologiques.

En effet, le choix de l'emplacement d'une centrale souterraine dans les Alpes doit tenir compte tout particulièrement de l'état de la masse rocheuse, c'est-à-dire du degré de son morcellement.

11. — Dans un article, paru en 1956 dans la revue *Cours d'eau et énergie* (« Die geologische Beurteilung von Sperrstellen und Speicherbecken »), R. STAUB, ancien professeur à Zurich, insista sur la nécessité d'arriver à une *compréhension mutuelle* totale entre le géologue et

l'ingénieur, qui s'occupent tous deux de l'étude d'un projet d'aménagement hydro-électrique.

Toutefois un certain désaccord, ne fut-ce que latent, peut surgir à diverses occasions. La position du constructeur dans la discussion est favorisée par le fait que c'est lui qui veille pour ainsi dire sur l'économie de l'entreprise. La base d'une contradiction éventuelle réside dans la manière d'aborder l'examen du compartiment de la croûte terrestre dans lequel sera logée la future construction. Chargé du calcul du prix de revient le constructeur est dominé par une certaine tendance de ne considérer, dans le bloc du terrain en question que les éléments *géométriques*. Chez le géologue, les considérations relatives aux propriétés *physiques* de la matière, remplissant le volume considéré, sont dominantes. Quel aspect peut prendre alors un conflit ? C'est le choix entre deux variantes, dont l'une est plus économique par sa géométrie, tandis que l'autre l'est moins ; mais cette dernière est alors caractérisée, d'après le géologue, par des conditions lithologiques et structurales plus favorables. La confrontation des deux solutions ne peut pas se faire sur le même plan. Le constructeur articule des chiffres, si parlants et logiques, tandis que les considérations du géologue ne se prêtent nullement à être présentées sous forme d'équations ou exprimées en unités monétaires. Alors le géologue ne dispose que d'un seul moyen pour avertir le constructeur : il attire l'attention de ce dernier sur les complications éventuelles *imprévues* mais qui exigeraient des dépenses allant au-delà du devis. Et ces dernières peuvent alors compromettre le choix de la variante, dont la géométrie représente un argument décisif. J'utilise intentionnellement le terme « imprévu », car le géologue, même le plus avisé et expérimenté, ne peut diagnostiquer avec une précision absolue les conditions géologiques qui caractérisent la profondeur. Mais le géologue doit évidemment nuancer ses avertissements relatifs aux « imprévus » en tenant compte des caractéristiques générales du terrain.

---

#### BIBLIOGRAPHIE

- Der Ausbau der Wasserkräfte des Bleniotales. *Cours d'eau et Energie*, 1956, p. 1.
- L.-W. COLLET (1914). — Charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse. *Archives des Soc. physique et nat.*, Genève (IV) t. XXXVII, pp. 529-533.
- L.-W. COLLET (1925). — Les débits solides des cours d'eau. *Congr. nat. de Navig. interne et d'Amen. des Eaux*, Grenoble.
- R. COTTIER et G. WELTI (1958). — Essai de mise en pression de la galerie d'amenée Dixence-Bagnes. *Bull. technique de la Suisse Romande*, 84e année, No 2, pp. 21-33.

- F. GYGLI (1956). — Grande Dixence. Album de photographies, Lausanne.
- N. OULIANOFF (1942). — Effet de l'écrasement naturel et expérimental des roches. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, Lausanne, vol. 62.
- N. OULIANOFF (1955). — Ecrasement sans trituration et mylonitisation des roches. *Eclogae geologicae Helvetiae*, vol. 47, p. 377.
- N. OULIANOFF (1959). — La géologie et les grands tunnels alpins. *Bull. techn. de la Suisse Romande*, Lausanne, No 9, pp. 121-129 et *L'Autoroute*, Bâle, vol. 28 (1959), No 6, pp. 93-102.
- R. STAUB (1956). — Die geologische Beurteilung von Sperrstellen und Speicherbecken. *Cours d'eau et Energie*, p. 178.
- A. STUCKY (1954). — Déformation de la cuvette du lac sous l'effet de la poussée de l'eau. *Bull. techn. de la Suisse Romande*, Lausanne, p. 333.
- Aug. SÜSTRUNK (1951). — Sondage du glacier (Gornergletscher, Zermatt) par la méthode sismique. *La Houille Blanche*, Grenoble.

## L'AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE DE LA GRANDE DIXENCE DANS LES ALPES VALAISANNES <sup>1</sup>

par Gérard Galibert

L'achèvement des travaux de captage et du barrage de la Grande Dixence, durant le mois de septembre 1961, a marqué la fin d'une épopée humaine et industrielle à l'échelle des Alpes. Il s'agit du plus beau et bientôt du plus puissant ensemble hydroélectrique des montagnes européennes.

De nombreux captages, réalisés depuis les années 30 d'abord dans les Pyrénées (l'aménagement des cirques du Lys et d'Espingo servit de modèle) puis dans les Alpes, ont montré la possibilité d'utiliser les dénivellations existant entre plusieurs vallées voisines pour concentrer dans un réservoir unique les eaux collectées en divers points et leur faire actionner les turbines d'une ou plusieurs centrales construites aux points les plus favorables. La retenue, alimentée en partie quelquefois au moyen d'eaux captées à un niveau inférieur et refoulées par pompage, est ainsi dissociée géographiquement de l'usine génératrice.

---

<sup>1</sup> Reproduction d'un article de la *Revue de Géographie alpine*, Tome I 1962 No 2, publiée par l'Institut de Géographie alpine de l'Université de Grenoble.